

раемость. Разработаны технологические приемы нанесения жаростойких керамических покрытий на истираемый материал, обеспечивающих повышение жаростойкости уплотнительных узлов турбины с 900 до 1100°C.

Разработанная технология изготовления абразивно-износостойкого материала, режимы пайки и составы припоев позволяют упрочнять торцы лопаток, обеспечивая увеличение их ресурса в 2–3 раза.

На заключительном этапе работы проведена пайка прирабатываемой пары: абразивно-износостойкого

материала на торцах рабочих лопаток турбины и истираемого материала на секторах кольца (разрезного) ступени ТВД с последующим нанесением жаростойкого керамического покрытия на истираемый материал (рис. 3); детали переданы для контрольных испытаний в составе технологического двигателя.

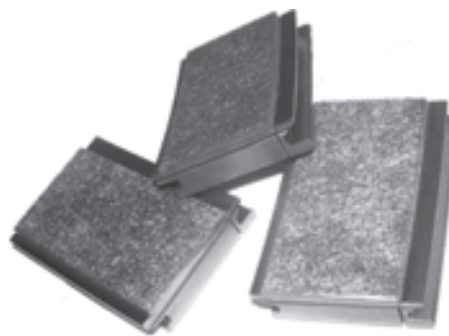


Рис. 3. Детали ТВД с истираемым уплотнительным материалом из волокон системы Fe(Ni)–Cr–Al–Y

*Е.Н. КАБЛОВ, В.В. СИДОРОВ,  
Д.Е. КАБЛОВ, В.Е. РИГИН, А.В. ГОРЮНОВ*

### **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИТЕЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

ВИАМ – ведущий отечественный разработчик литейных жаропрочных сплавов для турбинных и сопловых лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и наземных энергетических газотурбинных установок (ГТУ) и единственный в Российской Федерации разработчик супержаропрочных сплавов для рабочих лопаток с монокристаллической структурой перспективных ГТД пятого и шестого поколений.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, важнейшим условием получения высоких технических и технологических свойств жаропрочных суперсплавов для монокристаллического литья является технология их производства, которая должна обеспечить такие показатели материала, как стабильность химического состава в минимально узких пределах легирования; ультранизкое содержание вредных примесей: углерода, серы, газов (кислорода, азота), примесей цветных металлов (свинца, висмута, серебра, теллура, таллия и др.), неметаллических включений; плотное, с минимальным количеством усадочных дефектов, строение полученных литых прутковых заготовок, их высокий выход годного.

Для обеспечения перспективных ГТД разработанными в ВИАМ литейными жаропрочными суперсплавами (ЖС36-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ, ВКНА-1В-ВИ, ВКНА-25-ВИ и др.) создана технология производства, которая включает:

– корректировку химического состава сплавов в процессе выплавки;

- комплексное активное рафинирование металла от примесей в вакууме на основании проведенных термодинамических расчетов и экспериментальных исследований;
- микролегирование сплавов редкоземельными металлами для дополнительного повышения характеристик длительной прочности и жаростойкости сплавов;
- применение фильтрации расплава от неметаллических включений с использованием пенокерамического фильтра при разливке металла;
- разливку металла в стальные трубы с использованием утеплительных вставок для получения плотных заготовок и минимизацию размера дефектной головной части заготовки.

Одним из обязательных условий получения высоких и стабильных свойств жаропрочных суперсплавов является узкий химический состав по основным легирующим элементам, что подтверждается данными по сплаву нового поколения ВЖМ4-ВИ (табл. 1). В плавке 1 содержание Al, W, Re близко к расчетному, и отклонение от оптимального состава сплава составило 0,01–0,05% (в сумме: 0,07%). В плавке 2 содержание Al, W, Re находится на верхнем пределе легирования, и отклонение от оптимального состава сплава составило 0,25–0,32% (в сумме: 0,86%). В структуре плавки 2 после старения при 1100°C за 450 ч обнаружена ТПУ фаза в виде игл, что указывает на фазовую нестабильность металла данной плавки. Жаропрочные свойства сплава при температурах 1000 и 1100°C существенно снизились: при 1000°C долговечность при испытании на длительную прочность – в 1,5 раза, а при 1100°C – более чем в 2 раза.

Для стабилизации химического состава отработывалась методика выплавки сплава с проведением экспресс-анализа металла в процессе плавки, который включает отбор проб металла по ходу плавки, анализ металла на современном оптико-эмиссионном спектрометре, доводку состава расплава по результатам анализа до оптимального. В табл. 2 приведены результаты экспресс-анализа двух плавов, выполненного на пробах, взятых из расплава перед разливкой. В плавке 1 отмечено отклонение от оптимального состава по W и Ta, а в плавке 2 – по Al и Ta. Путем подшифтовки соответствующего количества этих элементов в расплав в итоговом соста-

Таблица 1

## Влияние стабилизации химического состава на свойства сплава ВЖМ4-ВИ

Условный номер плавки	Содержание в сплаве, % (по массе)				Микро-структура после старения при 1100°C за 450 ч	Долговечность, ч	
	Al	W	Re	$\Sigma(\text{Al} + \text{W} + \text{Re})$		при 1000°C, $\sigma = 230 \text{ МПа}$	при 1100°C, $\sigma = 120 \text{ МПа}$
	5,8*	4,0*	6,5*	16,3*			
1	5,75 (–0,05)	3,99 (–0,01)	6,49 (–0,01)	16,23 (–0,07)	ТПУ фаза отсутствует	659	1928
2	6,12 (+0,32)	4,29 (+0,29)	6,75 (+0,25)	17,16 (+0,86)	ТПУ фаза в виде игл	416	873

\* Оптимальный состав, в скобках указано отклонение от оптимального состава.

Таблица 2

## Стабилизация химического состава при выплавке сплава ВЖМ4-ВИ

Условный номер плавки	Проба расплава металла	Содержание элементов, % (по массе)		
		Al	W	Ta
Оптимальный состав сплава		6,0	4,0	4,5
1	Результаты экспресс-анализа	6,08	3,71	4,15
	Долегирование	–	+0,30	+0,30
	Результаты итогового анализа	6,16	3,99	4,40
2	Результаты экспресс-анализа	5,62	3,86	4,14
	Долегирование	+0,35	–	+0,40
	Результаты итогового анализа	6,03	3,95	4,53
1	Интервалы легирования	+0,16	–0,01	–0,10
2		+0,03	–0,05	+0,03

ве сплава полученные интервалы легирования по всем элементам укладываются в пределы  $\pm 0,2\%$ , что гарантирует фазовую стабильность такого металла.

Исследовано влияние микролегирования лантаном сплава ВЖМ4-ВИ на его жаропрочные свойства и жаростойкость (сопротивление высоко-температурному окислению). В вакуумной индукционной печи были выплавлены две плавки массой по 10 кг каждая. В первую плавку ввели La, а во вторую плавку La не вводили.

Результаты химического анализа показали, что после присадки La в сплаве понизилось содержание S. Это подтверждается результатами микрорентгеноспектрального анализа на аппарате «Суперпроб-733», приведенными в табл. 3. Обнаружены неметаллические включения La–Ni, содержащие до 60% La, в состав которых входит S. Таким образом, La связывает S в термически прочное тугоплавкое соединение, тем самым устраняя ее вредное влияние. Аналогично La связывает в сплаве P, что также подтверждают результаты анализов (см. табл. 3). Кроме того, об-

Таблица 3

## Локальный состав включений в сплаве ВЖМ4-ВИ с микролегированием лантаном (данные МРСА\*)

Условный номер образца	Содержание элементов, % (по массе)												
	Al	Cr	Co	Ni	Mo	Ru	Ta	W	Re	La	S	P	Сумма
1	0,9	0,4	1,6	20,5	2,3	1,0	2,2	Н/о**	0,8	56,5	6,1	Н/о	92,3
2	1,2	Н/о	2,1	22,6	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	60,9	Н/о	7,4	94,2
3	1,7	1,0	3,1	43,2	Н/о	0,8	4,0	1,1	Н/о	24,5	5,0	2,3	86,7

\* Исследование выполнила С.В. Степанова.

\*\* Н/о – не обнаружен.

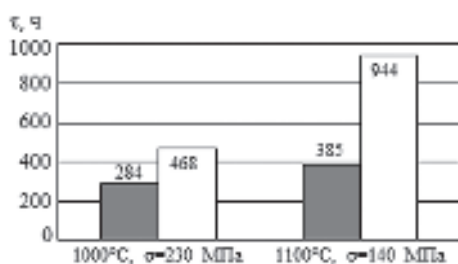


Рис. 1. Влияние лантана на долговечность  $\tau$  при испытании на длительную прочность сплава ВЖМ4-ВИ:

■ – без La; □ – с La

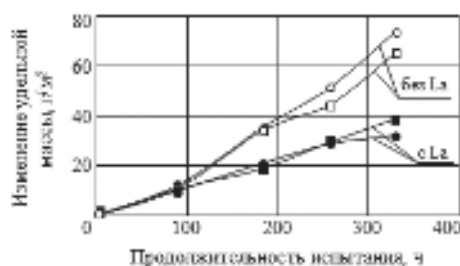


Рис. 2. Влияние лантана на изменение удельной массы при испытании сплава ВЖМ4-ВИ на жаростойкость при 1100°C в литом состоянии (○, ●) и после термообработки (■, □)

наружены неметаллические включения с La, в состав которых входят одновременно S и P. По данным качественного анализа, в состав неметаллических включений на основе La входят также  $O_2$  и C.

Испытания на длительную прочность проводили на термически обработанных образцах с монокристаллической структурой ориентации  $\langle 001 \rangle$  при температурах 1000 и 1100°C на базе 500 ч. Испытания на жаростойкость проводили при температуре 1100°C в течение 330 ч с теплосменами через 80–90 ч.

На рис. 1 показаны жаропрочные свойства сплава ВЖМ4-ВИ без La и с добавлением La. Видно, что благодаря введению в сплав La повысилась долговечность сплава при испытании на длительную прочность: при температуре 1000°C – в 1,65 раза, а при температуре 1100°C – в 2,45 раза.

На рис. 2 приведены кривые изменения удельной массы образцов (привес) с монокристаллической структурой без La и с присадкой La в литом и термообработанном состояниях. Видно, что привес на образцах с La в обоих состояниях в 1,5–2 раза меньше, чем на образцах без La.

На сплаве без La осыпавшаяся с поверхности образцов оксидная пленка – рыхлая, непрочная, в виде довольно крупных чешуек. На металле с La оксидная пленка – гладкая, ровная, отслаивается в виде мелкодисперсного порошка.

В результате проведенного рентгеноструктурного фазового анализа было установлено, что окалина состоит из набора оксидов\*.

Наибольшую интенсивность на дифрактограммах имеют линии оксида никеля NiO, при этом практически во всех случаях рентгеновская интенсивность линий оксида NiO, а также других оксидов, образовавшихся на сплаве без La, выше, чем для сплава с La. Следовательно, сплав без La подвержен более глубоким процессам окисления, чем сплав с добавлением La.

Результаты металлографического анализа структуры приповерхностного слоя после испытаний образцов из сплава ВЖМ4-ВИ, выплавленного без La и с добавлением La, показали, что в образце с La глубина обедненной зоны уменьшается приблизительно в 1,5–2 раза (по сравнению с образцом без La), что согласуется с величиной привеса образцов.

\* Исследования выполнены Н.А. Колмыковой.

Изучено влияние микролегирования редкоземельными металлами (лантаном и скандием) на длительную прочность интерметаллидного сплава ВКНА-25-ВИ. Установлено, что кривая долговечности имеет максимум при оптимальном расчетном содержании La; при недостатке в сплаве La, а также при его избыточном содержании значения долговечности снижаются.

С использованием полученных результатов выплавлены плавки сплава ВКНА-25-ВИ с введением оптимального расчетного содержания La и испытаны на длительную прочность при 1100°C и напряжениях 95; 100; 105 и 110 МПа. Для сравнения проведены испытания сплава с добавлением такого же количества Sc. Установлено, что полученные значения долговечности на металле с РЗМ превышают паспортные характеристики сплава, при этом эффект от введения Sc получен в меньшей степени, чем от введения La.

На основании полученных результатов испытаний построен график зависимости  $\sigma$ - $\tau$  (рис. 3). Видно, что полученные значения долговечности на металле с РЗМ лежат выше, чем паспортные характеристики сплава.

Среднее значение предела длительной прочности сплава ВКНА-25-ВИ с La при 1100°C на базе 1000 ч составило 98 МПа, тогда как по паспорту на этот сплав это значение при тех же параметрах испытаний равно 80 МПа. Таким образом, путем микролегирования сплава ВКНА-25-ВИ лантаном его предел длительной прочности  $\sigma_{1000}^{1000^\circ}$  повысился на 18 МПа.

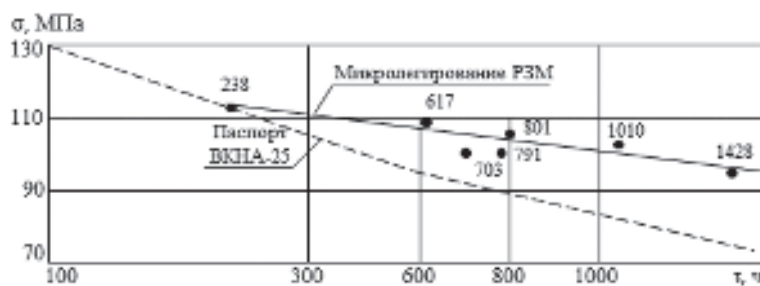


Рис. 3. Влияние микролегирования лантаном сплава ВКНА-25-ВИ (МОНО (111)) на характеристики его длительной прочности при температуре 1100°C

Одним из эффективных способов очистки металла от вредных примесных элементов, а также шлаковых и керамических включений, является фильтрация расплава при разливке. Известно, что использование фильтров (в особенности пенокерамики) в процессе разливки жаропрочных сплавов позволяет эффективно очищать расплав от шлаковых и неметаллических включений (НВ) – оксидов, нитридов, сульфидов и др.

Плавки проводились в вакуумной индукционной печи в керамическом тигле с массой 20 кг. В качестве шихты использовали 100% отходов сплава ВЖМ4-ВИ – отходы собственного и литейного производства (литники, литниковые чаши). Расплав разливали через нагретый фильтр\*.

\* Фильтры изготовлены Ю.И. Фоломейкиным.

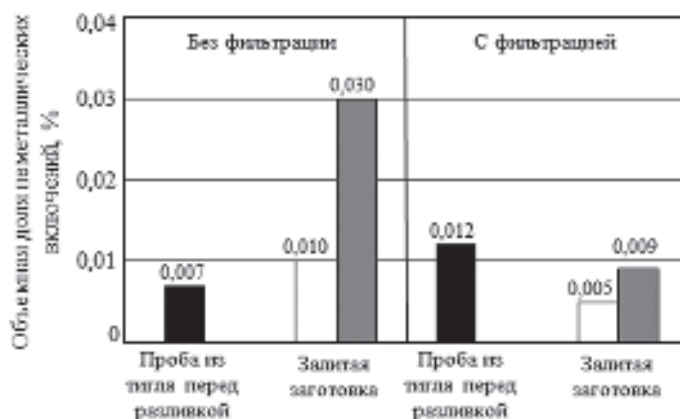


Рис. 4. Эффективность фильтрации расплава сплава ВЖМ4-ВИ через пенoкeраmический фильтр:

□ – низ заготовки; ■ – верх заготовки

В процессе плавки отбирали пробу жидкого металла перед фильтрацией и анализировали залитую заготовку (слиток) после фильтрации.

Была проведена оценка загрязненности НВ сплава после применения пенoкeраmического фильтра в процессе разливки, при этом определяли суммарную загрязненность поверхности шлифа частицами интенсивного темного цвета (оксиды, силикаты, фосфиды, кальциды)\*.

Неметаллические включения оценивали по следующим параметрам:

- суммарной площади, занимаемой НВ на каждом из восьми полей изображений (в процентах от площади изображения);
- плотности – количество частиц на единицу площади ( $1 \text{ мм}^2$ );
- длине единичных включений (в мкм).

По результатам количественного анализа НВ было установлено, что наибольшее количество НВ – в слитке, который не подвергался фильтрации (0,036–0,111%), а после фильтрации количество НВ существенно ниже и колеблется в среднем от 0,005 до 0,022%. Кроме того, после фильтрации расплава, как правило, уменьшается размер НВ. Особенно значимое изменение наблюдается по максимальной длине включений: после фильтрации максимальный размер включения не превышает 11 мкм, в то время как до фильтрации встречались НВ длиной до 95 мкм.

За счет фильтрации в металле в 2–2,5 раза понизилось содержание серы и кислорода: S – с 0,0006 до 0,0003%,  $O_2$  – с 0,0020 до 0,0008%.

Эффективность применения фильтрации расплава через пенoкeраmический фильтр показана на рис. 4. Видно, что перед разливкой объемная доля НВ в металле составляет всего 0,007–0,012%. Однако, если расплав залили в заготовку без применения фильтра, то объемная доля НВ в металле возросла как в нижней, так и в верхней частях заготовки. Если же расплав залили в заготовку через фильтр, то объемная доля НВ в обоих случаях понизилась (верх и низ заготовки).

\* Исследование выполнено И.В. Исходжановой.



Следует отметить, что в верхней части заготовки объемная доля НВ выше, чем в нижней части, что, вероятно, связано с частичным всплыванием НВ в процессе кристаллизации расплава.

Результаты применения разработанной технологии получения жаропрочных суперсплавов нового поколения показали:

– уменьшение в 2–3 раза интервалов легирования по сравнению с полученными в серийном производстве для сплавов ЖС6У-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ, ЖС32-ВИ и др.: с  $\pm(0,4-0,7)$  до  $\pm(0,2-0,3)\%$ ;

– обеспечение ультранизкого содержания вредных примесей – углерода:  $\leq 0,005\%$ , серы, кислорода и азота:  $\leq 0,001\%$  ( $\leq 10$  ppm) при фактическом содержании 0,0001–0,0007% (1–7 ppm) каждого. Фактическое содержание S, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> в серийных сплавах составляет 0,001–0,003% (10–30 ppm);

– увеличение выхода годного заготовок по сравнению с серийным производством возросло с 65–70 до 80–85%.

По этим показателям отечественные жаропрочные суперсплавы, полученные по разработанной в ВИАМ технологии, не уступают зарубежным аналогам, производимым ведущими мировыми фирмами «Cannon Muskegon», «Rolls-Royce» и др. (табл. 4).

Используя новейшие достижения в области вакуумной металлургии жаропрочных никелевых сплавов и результаты научно-исследовательских работ, проведенных в ВИАМ по жаропрочным суперсплавам нового поколения, разработана ресурсосберегающая технология рафинирующего переплава образующихся отходов этих сплавов в вакуумных индукционных печах, которая позволяет из 100% отходов получать сплавы, полностью отвечающие по чистоте и свойствам требованиям действующих ТУ и не уступающие сплавам, изготовленным из первичных шихтовых материалов (табл. 5).

На рис. 5 приведены результаты испытаний на длительную прочность при температурах 1000 и 1100°C рений-рутенийсодержащего сплава ВЖМ4-ВИ (МОНО (001)), выплавленного с использованием 100% конди-

Таблица 4

Показатели качества шихтовых заготовок литейных жаропрочных суперсплавов производства ВИАМ и фирмы «Cannon Muskegon» (США)

Качество сплавов			Технология выплавки сплавов	
			ФГУП «ВИАМ»	фирмы «Cannon Muskegon» (США)
Интервал легирования по основным элементам, % (по массе)			$\pm(0,2-0,3)$	$\pm(0,2-0,35)$
Содержание примесей в сплавах, ppm	[O]	по ТУ фактическое	$\leq 10$ 2–6	$\leq 10$ 2–6
	[N]	по ТУ фактическое	$\leq 10$ 1–3	$\leq 10$ 1–2
	[S]	по ТУ фактическое	$\leq 10$ 2–4	$\leq 12$ 1–5

Таблица 5

**Содержание примесей в сплаве ВЖМ4-ВИ, выплавленном по оптимальной технологии с различным содержанием отходов**

Количество отходов, %	Содержание примесей*, % (по массе)				
	C	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Si
100% свежей шихты	$\frac{0,0035}{0,0025}$	$\frac{0,0004}{0,0004}$	$\frac{0,0003}{0,0006}$	$\frac{0,0003}{0,0002}$	$\frac{0,025}{0,025}$
50% свежей шихты + + 50% отходов	$\frac{0,0030}{0,0023}$	$\frac{0,0003}{0,0004}$	$\frac{0,0005}{0,0004}$	$\frac{0,0003}{0,0001}$	$\frac{0,03}{0,03}$
100% отходов	$\frac{0,0030}{0,0026}$	$\frac{0,0004}{0,0003}$	$\frac{0,0005}{0,0006}$	$\frac{0,0003}{0,0002}$	$\frac{0,025}{0,03}$

Продолжение табл. 5

Количество отходов, %	Содержание примесей, % (по массе)						
	Fe	P	Bi	Pb	Ag	Te	Tl
100% свежей шихты	0,20	0,0018	0,000002	<0,0001	<0,00001	0,00004	0,00002
50% свежей шихты + + 50% отходов	0,24	0,0015	0,000002	<0,0001	<0,00001	0,00004	0,00002
100% отходов	0,29	0,0019	0,000002	<0,0001	<0,00001	0,00004	0,00002

\* В числителе – содержание примесей в исходной шихтовой заготовке, в знаменателе – содержание примесей в монокристалле.

ционных литейных отходов, в сравнении с паспортными характеристиками сплава, выплавленного с использованием 100% первичных шихтовых материалов. Видно, что значения долговечности сплава ВЖМ4-ВИ, выплавленного по спецтехнологии с использованием 100% отходов, соответствуют паспортным характеристикам сплава.

Данная технология позволяет создать замкнутый цикл возврата дорогих и дефицитных легирующих металлов (Re, Ru, Ta, Co, W и др.) в про-

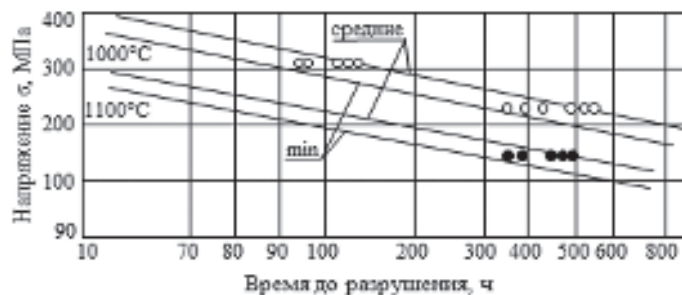


Рис. 5. Длительная прочность сплава ВЖМ4-ВИ (МОНО (001)), выплавленного с использованием 100% кондиционных отходов (•, ○). Приведены минимальные и средние значения (—) по паспорту № 1789 для 100%-ной первичной шихты



изводство, обеспечить их экономию и снизить стоимость жаропрочных суперсплавов нового поколения на 40–50% без снижения их качества; технология не имеет отечественных аналогов, защищена Патентом РФ.

Разработанные технологии по производству жаропрочных суперсплавов нового поколения реализованы на созданном в ВИАМ научно-производственном комплексе по изготовлению литых прутковых заготовок жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для литья лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурами. Данный комплекс включает в себя ряд отдельных участков, оборудованных современным производственным, аналитическим и испытательным оборудованием, что позволяет обеспечить качество изготавливаемой продукции на уровне мировых стандартов.

На созданном в ВИАМ научно-производственном комплексе – помимо выплавки жаропрочных суперсплавов нового поколения – производят также переработку отходов серийных литейных жаропрочных сплавов, поступающих с моторостроительных и ремонтных заводов.

К настоящему времени на моторостроительные авиационные предприятия поставлено свыше 250 т литых прутковых заготовок сплавов ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС6У-ВИ, ЖС6К-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ, ЖСЗДК-ВИ, ВХ4Л-ВИ, изготовленных с применением 100% отходов этих предприятий. Поставленные сплавы успешно использованы при отливке ответственных деталей современных ГТД.

*Е.Н. КАБЛОВ, В.Н. ТОЛОРАЙЯ*

## **ВИАМ – ОСНОВОПОЛОЖНИК ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД И ГТУ**

### *Применение монокристаллической структуры в турбинных лопатках ГТД из никелевых жаропрочных сплавов*

Создание в середине 40-х годов в Англии первого дисперсионно-твердеющего сплава Nimonic 80 для изготовления рабочих лопаток газовых турбин методом штамповки открыло новую главу в развитии жаропрочных материалов на никелевой основе. Открытие второй главы в истории этих материалов принадлежит СССР, когда в ВИАМ академиком С.Т. Кишкиным было предложено и реализовано решение о применении для лопаток ГТД литейных жаропрочных сплавов, определившее дальнейшее развитие авиационной техники. Были разработаны первые литейные жаропрочные никелевые сплавы ЖС3, ЖС6 и ЖС6К, позволившие создать литые лопатки ГТД и показать их преимущество перед деформированными. Одновременно была предложена гетерофазная теория жаропрочности, что позволило разработать основные положения теории легирования жаропрочных сплавов и практики их применения.

Дальнейшее повышение жаропрочности можно было достигнуть только переходом на изготовление лопаток методами точного литья по выплавляемым моделям. Следует отметить, что данная технология является в настоящее время практически единственным способом получения охлаждаемых лопаток, конфигурация внутренней полости которых имеет сложную геометрию. Это новое направление в развитии жаропрочных